

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-020848

(43)Date of publication of application : 23.01.2002

(51)Int.CI.

C22F 1/10  
 C22C 14/00  
 C22F 1/18  
 // C22F 1/00

(21)Application number : 2000-204927

(71)Applicant : TOKI CORPORATION KK

(22)Date of filing : 06.07.2000

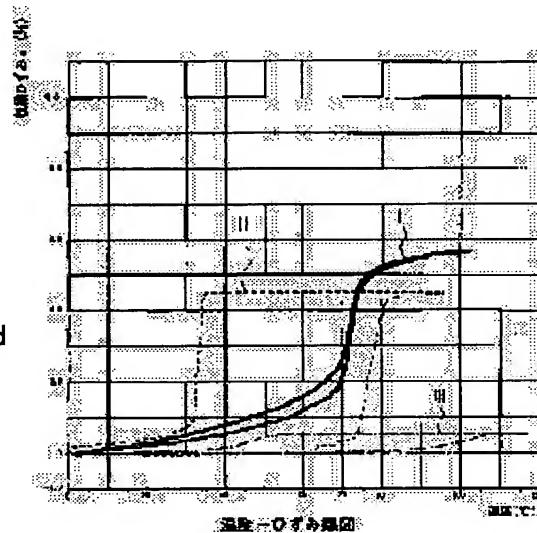
(72)Inventor : HONMA MASARU

## (54) METHOD FOR TREATING SHAPE MEMORY ALLOY, AND SHAPE MEMORY ALLOY

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a shape memory alloy with which disadvantages of the conventional general shape memory alloy can be removed and a great bidirectional shape memory effect can be provided, and also to provide a method for treating shape memory alloy for obtaining the alloy.

**SOLUTION:** A shape memory alloy stock is subjected to steps of: forming a microcrystal structure having practically uniform crystal size; and properly arranging crystallographic orientation in a direction practically suited to a predetermined moving direction. By this method, the shape memory alloy which has fine crystals and practically uniform crystal size and in which crystallographic orientation is properly arranged in the direction practically suited to the predetermined moving direction can be obtained.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-20848

(P2002-20848A)

(43)公開日 平成14年1月23日 (2002.1.23)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テマコード (参考)

C 22 F 1/10  
C 22 C 14/00  
C 22 F 1/18  
// C 22 F 1/00

C 22 F 1/10  
C 22 C 14/00  
C 22 F 1/18  
1/00

G  
Z  
H  
B

604

604

審査請求 未請求 請求項の数24 O L (全19頁) 最終頁に続く

(21)出願番号

特願2000-204927(P2000-204927)

(71)出願人 390031521

トキコーポレーション株式会社  
東京都大田区大森北3丁目43番15号

(22)出願日

平成12年7月6日 (2000.7.6)

(72)発明者 本間 大

神奈川県横浜市金沢区富岡西5丁目39番地  
27号

(74)代理人 100076266

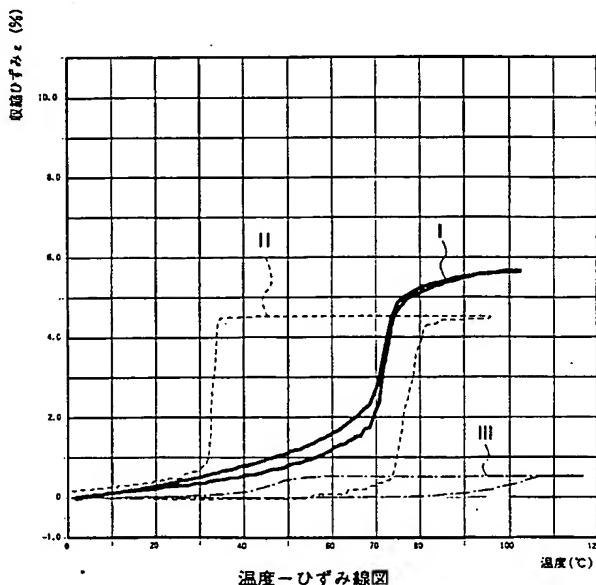
弁理士 大森 泉

(54)【発明の名称】 形状記憶合金の処理方法および形状記憶合金

(57)【要約】

【課題】 従来の一般的な形状記憶合金の欠点を解消できるとともに、巨大な双方向性形状記憶効果を持つ形状記憶合金および該合金を得るための形状記憶合金処理方法を提供する。

【解決手段】 形状記憶合金素材に対し、結晶の大きさを実質的に均一な微細結晶構造とする工程と、結晶の方向を実質的に予定運動方向に適した方向に揃える工程を行い、微細結晶で結晶の大きさが実質的に均一で、かつ結晶の方向が実質的に予定運動方向に適した方向に揃えられた形状記憶合金を得る。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 形状記憶合金素材を結晶の大きさが実質的に均一な微細結晶構造とする工程と、結晶の方向を実質的に予定運動方向に適した方向に揃える工程とを有してなる形状記憶合金の処理方法。

【請求項2】 形状記憶合金素材を結晶の大きさが実質的に均一な微細結晶構造とする工程により平均的結晶粒径を10ミクロン以下とする請求項1または2記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項3】 アモルファス状態またはそれに近い状態の形状記憶合金素材を、少なくとも回復再結晶が始まる段階では予定運動方向に応力が作用されるようにした状態で、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱し、発生する前記予定運動方向の内部応力を徐々に緩和する形で前記予定運動方向に異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程と、

オーステナイト相が残留しない極低温下で、前記予定運動方向の応力によって前記形状記憶合金素材に強い変形を加え、該応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程と、適当な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、オーステナイト変態終了温度A<sub>f</sub>点と再結晶温度との間の温度に前記形状記憶合金素材を加熱し、前記予定運動方向に適した方向に各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを有してなる形状記憶合金の処理方法。

【請求項4】 形状記憶合金素材に冷間強加工を加え、該形状記憶合金素材内部の結晶構造を破壊した後、前記形状記憶合金素材を、少なくとも回復再結晶が始まる段階では予定運動方向に応力が作用されるようにした状態で、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱し、発生する前記予定運動方向の内部応力を徐々に緩和する形で前記予定運動方向に異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程と、

オーステナイト相が残留しない極低温下で、前記予定運動方向の応力によって前記形状記憶合金素材に強い変形を加え、該応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程と、適当な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、オーステナイト変態終了温度A<sub>f</sub>点と再結晶温度との間の温度に前記形状記憶合金素材を加熱し、前記予定運動方向に適した方向に各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを有してなる形状記憶合金の処理方法。

【請求項5】 異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程において、冷間強加工を温度特異点Bより十分低い極低温状態で施す請求項4記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項6】 異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程において、形状記憶合金素材を、予定運動方向に異方性を持った状態で、少なくとも回復再結晶が始まる段階では予定運動方向に応力が作用されるようにした状態で、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱請求項4または5記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項7】 異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程において、形状記憶合金素材を、該形状記憶合金素材に予定運動方向の応力を加えたまま拘束した状態で、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱する請求項3, 4, 5または6記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項8】 異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程において、形状記憶合金素材を緩みのない無負荷状態で形状を拘束したまま、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱する請求項3, 4, 5, 6または7記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項9】 オーステナイト相が残留しない極低温下で、予定運動方向に異方性を持った結晶を有する形状記憶合金素材に、前記予定運動方向の応力によって強い変形を加え、該応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程と、適当な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、オーステナイト変態終了温度A<sub>f</sub>点と再結晶温度との間の温度に前記形状記憶合金素材を加熱し、前記予定運動方向に適した方向に各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを有してなる形状記憶合金の処理方法。

【請求項10】 応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程において、前記すべり変形によって生じる他の結晶粒との位置関係の矛盾を結晶粒界付近の組織に塑性的な変形として集中的に蓄える請求項3, 4, 5, 6, 7, 8または9記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項11】 各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程において、適当な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、温度特異点S付近の温度に形状記憶合金素材を加熱する請求項3, 4, 5, 6, 7, 8, 9または10記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項12】 各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程において、完全にオーステナイト化して剛性を持った各結晶粒が、形状回復しようとして発生した力が作用し合う状態を作り、結晶粒界付近の組織を変形させる請求項3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10または11記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項13】 応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程

と各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを必要回数繰り返す請求項3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11または12記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項14】 各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程の後、応力を管理しながら、ひずみを拘束しない状態でMr点以下の温度と、強度の塑性変形だけが緩和される温度との間で熱サイクルを加える工程を有する請求項3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12または13記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項15】 热サイクルを加える工程において、加熱時に比べ、冷却時に作用する応力を大きくする請求項14記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項16】 形状記憶合金素材は金属間化合物である請求項1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14または15記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項17】 形状記憶合金素材はTi-Ni系またはTi-Ni-Cu系である請求項16記載の形状記憶合金の処理方法。

【請求項18】 微細結晶の多結晶体とされ、結晶の大きさを実質的に均一とされるとともに、結晶の方向を予定運動方向に適した方向に実質的に揃えられたことを特徴とする形状記憶合金。

【請求項19】 平均的結晶粒径を10ミクロン以下とされた請求項19記載の形状記憶合金。

【請求項20】 アモルファス状態またはそれに近い状態の形状記憶合金素材を、少なくとも回復再結晶が始まる段階では予定運動方向に応力が作用されるようにした状態で、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱し、発生する前記予定運動方向の内部応力を徐々に緩和する形で前記予定運動方向に異方性を持つ微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程と、

オーステナイト相が残留しない極低温下で、前記予定運動方向の応力によって前記形状記憶合金素材に強い変形を加え、該応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程と、適當な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、オーステナイト変態終了温度Ar点と再結晶温度との間の温度に前記形状記憶合金素材を加熱し、前記予定運動方向に適した方向に各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを経て処理されたことを特徴とする形状記憶合金。

【請求項21】 形状記憶合金素材に冷間強加工を加え、該形状記憶合金素材内部の結晶構造を破壊した後、前記形状記憶合金素材を、少なくとも回復再結晶が始まる段階では予定運動方向に応力が作用されるようにした状態で、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱し、発生する前記予定運動方向の内部応力を徐々に緩和する形で前記予定運動方向に異方性を

持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程と、

オーステナイト相が残留しない極低温下で、前記予定運動方向の応力によって前記形状記憶合金素材に強い変形を加え、該応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程と、適當な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、オーステナイト変態終了温度Ar点と再結晶温度との間の温度に前記形状記憶合金素材を加熱し、前記予定運動方向に適した方向に各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを経て処理されたことを特徴とする形状記憶合金。

【請求項22】 オーステナイト相が残留しない極低温下で、予定運動方向の応力によって形状記憶合金素材に強い変形を加え、該応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程と、適當な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、オーステナイト変態終了温度Ar点と再結晶温度との間の温度に前記形状記憶合金素材を加熱し、前記予定運動方向に適した方向に各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを経て処理されたことを特徴とする形状記憶合金。

【請求項23】 金属間化合物である請求項18, 19, 20, 21または22記載の形状記憶合金。

【請求項24】 Ti-Ni系またはTi-Ni-Cu系である請求項23記載の形状記憶合金。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、アクチュエータ(駆動装置)用として用いるに好適な形状記憶合金および該形状記憶合金を得るための形状記憶合金の処理方法に関する。

##### 【0002】

【従来の技術】 従来、一般に、形状記憶合金素材を使用に適した特性を有するように処理する際、結晶粒を微細化したり、結晶粒の方位を調整することは行われていなかった。

【0003】 一方、形状記憶合金を利用するためには所定の形状を記憶させる必要があり、このためにはそれぞれの合金に特有の熱処理をする必要がある。従来、この熱処理は、「形状記憶処理」と呼ばれているが、非常に微妙な処理であるから、厳密に条件を管理することが必要である。例えば、従来よりよく行われている一般的なTi-Ni系合金の形状記憶処理方法としては、形状記憶合金をあらかじめ十分に加工硬化させた上で、所定の形状に加工し、そのままの形に固定して400～500℃の温度で、数分～数時間置く方法(中温処理と呼ばれている)や、800℃以上の温度にしばらく置いた後、急冷し、所定の形状に加工して、これを200～300

℃の比較的低い温度で保持する方法（低温処理と呼ばれている）等があった（参考文献：工業調査会発行、石川昇二、木梨貞男、三輪学編著、「図解最新特許に見る形状記憶合金応用アイデア集」）。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】従来の一般的な形状記憶合金をアクチュエータとして用いる際には、主として次のような欠点があった。

【0005】(a) 応答性（速度）が悪い、(b)  $M_s$ 、 $M_f$ 点を上げにくいため、使用可能な温度域が限定される、(c) 有効に取り出せる力が小さい、(d) 破断に至るまでの寿命が短い、(e) 短期間のうちに記憶形状の消失や永久ひずみが発生しやすい、(f) 短期間のうちに運動ひずみが減少する、(g)  $T_i - N_i$ 系、 $T_i - N_i - Cu$ 系等の、金属間化合物として共有結合性が強い難加工性の形状記憶合金素材の場合、組成によっては、特に脆性が強くなり、割れやすいため、利用が困難である、このような問題点があるため、従来は、形状記憶合金の用途の8割ないしは9割以上は超弾性ばね材としての利用であり、残り僅かがアクチュエータとしての用途であった。しかも、アクチュエータ用途の形状記憶合金の大半は、コイルばね、線材または板材の形状とされた上、曲げ変形またはねじりおよび曲げ変形からの形状回復を利用して（コイルばね形状の場合、巨視的には、形状記憶合金は伸縮するが、真の意味では、その変形はねじりおよび曲げ変形である）。このように曲げ変形またはねじりおよび曲げ変形からの形状回復を利用して使用する理由は、従来の一般的な形状記憶合金は安定に利用できる形状記憶効果の範囲が非常に小さいため、この小さなひずみが増幅されるような形態で使用しなければならぬからであった。従来の一般的な形状記憶合金の運動ひずみは、引っ張りひずみ換算で最大数%から10%近いと言われているが、これは、1～数回の動作の話で、実際には変形と形状回復を繰り返すと運動ひずみも減少し、記憶形状を失い、最終的には破断していた。

【0006】また、前記従来の従来の一般的な $T_i - N_i$ 系合金の形状記憶処理方法は、いずれの方法も、加工硬化によって強化された組織の中に部分的に形状記憶効果や超弾性を発生できる組織を生じさせることにより、形状の安定性を保つと同時に超弾性や形状記憶効果を得ようとするものである。言い換えれば、形状の安定性を得るために超弾性や形状記憶効果をある程度犠牲にせざる終えない処理であった。

【0007】他方、本発明者は、前に特開昭63-240939号において、多結晶体に変態温度区間を含む加熱過程と冷却過程とを備えた熱サイクルを与えるとともに、この熱サイクルの少なくとも一部に重ねて、前記多結晶体に方向性を有するエネルギー場を作用させることを特徴とする多結晶体の結晶方位再配列方法を提案した。

この多結晶体の結晶方位再配列方法を形状記憶合金に適用すると、前記従来の一般的な形状記憶合金の欠点を飛躍的に改善することができる。

【0008】しかしながら、この結晶方位再配列方法においては、形状記憶合金に適用する場合、結晶粒の微細化を行わず、むしろ結晶を成長させて大きくしていた。また、形状記憶合金素材の結晶の方向を揃える最終過程において引張力等を作用させることにより、最終的に得られる形状記憶合金の組織を壊してしまう面があった。

10 このため、前記従来の一般的な形状記憶合金の問題を解決する上で、やや不十分な面があった。

【0009】本発明は、このような従来の事情に鑑みてなされたもので、本発明の1つの目的は、応答性のよい形状記憶合金および該形状記憶合金を得るための形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0010】本発明のさらに他の目的は、使用可能な温度域が広い形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0011】本発明のさらに他の目的は、実用的に有効に取り出せる力が大きい形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0012】本発明のさらに他の目的は、繰り返し大きな運動ひずみが取り出せる形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0013】本発明のさらに他の目的は、巨大な双方向性形状記憶効果を持つ形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0014】本発明のさらに他の目的は、破断に至るまでの寿命が長い形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0015】本発明のさらに他の目的は、記憶形状が消失しにくい形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0016】本発明のさらに他の目的は、運動ひずみの減少が少ない形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0017】本発明のさらに他の目的は、前記の種々の優れた特性が長期多数回にわたる繰り返しにおいても安定している形状記憶合金および該形状記憶合金を得るために形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0018】本発明のさらに他の目的は、これまで脆性が強く、割れやすいため利用が困難とされていた材料をも素材として用い、韌性を持った線材や板材状の形状記憶合金とすることができる形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0019】本発明のさらに他の目的は、形状記憶合金

の組織を壊すことなく、結晶の方向を揃えることができる形状記憶合金の処理方法を提供することにある。

【0020】本発明のさらに他の目的は、以下の説明から明らかになろう。

【0021】

【課題を解決するための手段】形状記憶合金の結晶粒には方位があり、ミクロ的には原子同士の移動範囲が限られた可逆的なすべりあるいは剪断変形（兄弟晶）を出現できる方向は限られているが、複数存在する。例えばTi-Ni系合金の場合、この兄弟晶といわれる変形が可能な方位が立体的に24もある。本発明においては、形状記憶合金の結晶の方向を実質的に予定運動方向に適した方向、言い換れば形状記憶合金の予定運動方向の運動に適した方向に揃えるようにする。ここで、本明細書において予定運動方向とは、引張りやねじり曲げ運動等、処理後の形状記憶合金をアクチュエータとして使う場合に想定された方向をいう。例えば線状のものを収縮-弛緩する形で使う場合は引張り方向、コイルばね形状で使う場合はねじり方向となる（なお、コイルばね形状で使う場合は、加熱時、ねじりおよび曲げ変形からの形状回復を行うことになるので、厳密に言うと予定運動方向はねじりおよび曲げ方向と言うこともできるが、実際にはねじりの要素の比率の方がはるかに高いので、実質的に予定運動方向はねじり方向である）。

【0022】本発明による形状記憶合金の処理方法の一つは、形状記憶合金素材を結晶の大きさが実質的に均一な微細結晶構造とする工程と、結晶の方向を実質的に予定運動方向に適した方向に揃える工程とを有してなる。

【0023】本発明による形状記憶合金の一つは、微細結晶の多結晶体とされ、結晶の大きさを実質的に均一とされるとともに、結晶の方向を所定方向の運動に適した方向に実質的に揃えられたものである。

なお、各結晶粒の大きさは10ミクロン以下とすることが好ましく、特に数ミクロンないしは1ミクロン以下とすることが好ましい。このような大きさとすると、変形-形状回復を繰り返しても特に安定した状態になる。

【0024】一般に、結晶質の材料において各材料がそれぞれ持つ特有の性質は、その材料の結晶内の現象に基づくことが多い。したがって当然、これらの特有の性質は、該材料が単結晶の状態であるときに最も顕著に認められる場合が多い。このため、ある材料のある優れた性質ないしは機能を利用しようとする場合、一般には該材料を単結晶体とすると最も良い結果が得られることになる。形状記憶合金の場合も、基本的にはこのことが当てはまる。単結晶の形状記憶合金は、全体が完全なマルテンサイト状態になるような低温状態では、可逆的なすべりを起こすことのできる範囲では、すべり方向に極く小さな力で変形させることができ、大きく良好な形状記憶効果を得ることができる（ここでいう可逆的すべり変形とは、形状記憶効果でいう回復可能な変形のもとになる

限られた範囲内での可逆的運動が可能な剪断変形であり、塑性変形の原因である恒久的かつ連続的な原子同士のすべりではない）。

【0025】しかしながら、実際には、単結晶体の材料を工業的に製造するのは極めて困難であるし、製造できても非常に高価なものとなる。また、形状記憶合金の場合、単結晶体とすると、組織は不安定となる。

【0026】従来の一般的な形状記憶合金は、勿論多結晶体であり、しかも一般に各結晶の方位はランダムであり、各結晶の大きさも不均一であるので、前記したような種々の欠点が生じると考えられる（これについては、後でさらに詳しく説明する）。

【0027】しかるに、本発明者は、前記本発明の形状記憶合金のように、微細結晶の多結晶体とし、結晶の大きさを実質的に均一とするとともに、結晶の方向を所定方向の運動に都合のよい方向に実質的に均一に揃えるようすれば、単結晶の形状記憶合金の長所と前記従来の一般的な形状記憶合金の長所との両方を併せ持つ形状記憶合金が得られることを見い出した。形状記憶合金内部の結晶粒の大きさと運動の方向を揃えてやれば、それぞれの結晶粒に巨大な形状回復力が発生しても無理な変形が加わる部分がなく、内部組織は破壊しにくくなる。また各結晶が適当に小さければ、それぞれの変形方向の違い等によって生じる構造的矛盾も小さく、結晶自体も壊れにくく。さらにこうした材料では、結晶粒界付近の組織の体積的割合も多いため、構造的矛盾を吸収できる能力も高い。また、このような材料では、結晶粒界付近の組織がアモルファス的性質を示すせいか、素材の段階で脆い材料でも、広いひずみ範囲で韌性に富んだ線材や板材にすることができる。微細でも各結晶の方向が揃えば、比較的大きな形状記憶効果を安定して取り出せる。また各結晶の運動しやすい方向が揃っているため、変形時に必要な力が小さくてよい。結晶粒界付近の組織の体積的割合が多いため、不純物の析出等の方法を使わなくても、この部分に大きな弾性エネルギーを蓄えることができるので、変形時に必要な力が小さくてよい性質とあいまって安定した大きな双方向性形状記憶効果を得ることができる。

【0028】今述べた事項と一部重複することとなるが、このようにして本発明の形状記憶合金は、次に列記するような優れた特性を有している。

【0029】(A) 温度-ひずみ線上で温度のヒステリシスが小さく、変態温度域も狭いため、加熱-冷却が迅速に行われ、応答性がよく、高速な往復運動ができる。例えば、本発明をTi-Ni-Cu系形状記憶合金に適用した場合、比較的広い応力範囲で温度のヒステリシスをほぼ0にすることもできる。また、本発明の形状記憶合金は、僅か10°Cの温度幅で150Mpaの作用負荷の状態でフルストロークの8割近い(ひずみε=4%)の連続した往復運動ひずみを繰り返し取り出すことに成

功している。これはエンジンに例えると、従来の形状記憶合金と比較して同じ大きさで回転数が高くなるようなものである。耐荷重性の向上と合わせ、馬力が数段高くなることと同じ意味がある。サーボアクチュエータ等双方の運動が必要な機構では応答性の大幅な向上を期待できる。

【0030】(B) 形状記憶合金から実用的に取り出せる力（以後回復力と記す）を大きくすることができる。回復力は、最大回復応力ではなく、繰り返し利用できる疲労等を考慮した応力の限界から決まる。これは、エンジンやモーターに例えると最大トルクに当たる。本処理を施した形状記憶合金は、最大回復応力が同じ材料であっても、この繰り返し動作の中で実用的に利用できる応力の限界が高い。従来の形状記憶合金は回復力が小さく、無理に大きな応力を加えたまま、運動を繰り返すと前記のように記憶形状の喪失（いわゆるダレ）や運動ひずみの減少、破断を生じていた。これは、アクチュエータ運動寿命が短くなることを意味する。前記したように従来の一般的な形状記憶合金アクチュエータが、多くの場合、コイルばねの形状とされていたのは、このへんの事情によるもので、コイルばね状の形状記憶合金が変形しても、材料自体のひずみは非常に小さい。したがって実際に利用している応力は、実際に発生できる力より、かなり小さなものであった。

【0031】(C) 繰り返し大きな運動ひずみが取り出せる。直線形状のものでは、引張りひずみで5%以上の変形-形状回復の繰り返しが可能である。運動として取り出せるひずみ（以後運動ひずみという）で5%以上という値は、長さ1mの丸棒が5cmも伸び縮みすることに相当する。これは、一般的なコイルばねが、コイル形状と直線形状の間で変形-形状回復するより、はるかに大きな変形量である。この値は、超弾性合金も含めた一般的な形状記憶合金の利用可能な範囲をはるかに超える大きさである。Ti-Ni-Cu系合金等の脆性の強い素材に本発明の処理を施した場合、この巨大な運動ひずみを1億回以上安定して取り出せることがある。なお、従来の形状記憶合金がコイルばねで使用される場合、運動ひずみは、引張方向に換算すれば、0.1%以下の場合が多かった。形状記憶合金のコイルばねも、鉄等の非形状記憶合金のばねと同じ位の変位でしか利用されない場合が多かったのである。

【0032】(D) 巨大な双方向性形状記憶効果を持たせることが可能である。双方向性形状記憶効果とは、低温で形状回復と反対方向の変形を与える際に力が不要であるか、または極めて少なくてよい現象である。見た目には、低温時に変形した形状と高温時に形状回復した形状との2つの形状を覚えているような挙動を示す。例えば、直線の引張方向に記憶形状を持つものでは、加熱すると記憶している長さに収縮して硬くなる一方、冷却時には、負荷の無い状態でも、ちょうど筋肉が弛緩するよ

うに柔らかくなり、自分で伸びて低温時の元の長さと形に戻る。つまり加熱と冷却だけで、外部からバイアス力を作用させることなく、伸び縮みするわけである。文献等によると双方向性形状記憶効果は、一般的に引張りひずみ換算で $\epsilon = 1\%$ 以下の部分的な現象であり、不安定なため実用化が困難とされている。事実、この現象を利用した機器類は、これまでのところほとんど見当たらぬ。一方、本発明の処理を用いると形状記憶効果の発生するほぼ全域、すなわち形状回復可能な全ひずみ量の範囲で巨大な双方向性形状記憶効果を発生できる。本発明の処理を利用した多くの場合、無負荷状態でも引張りひずみ5%以上の双方向性形状記憶効果を発現することができる。本発明の処理で作られた多結晶性の形状記憶合金は、各結晶の方向と大きさと配置が外部からの変形に適応した状態のため、加工中に加えられる材料内部の形状回復方向と反対の残留応力場が僅かに存在するだけで、全運動ひずみの範囲に近い大きさの安定した双方向性形状記憶効果を誘発できるものと本発明者は考えている。この巨大な双方向性形状記憶効果は、無負荷状態で1億回近い繰り返し動作でも安定して発現する。

【0033】(E) 破断に至るまでの寿命が長い。従来、形状記憶合金アクチュエータの動作寿命は、小さな運動ひずみで使っても最大でも10万回程度の場合が多くた。特に引張りひずみで2%を越える大きな運動を行う場合は、寿命が極端に短くなる傾向があった。しかし本発明の処理を施した形状記憶合金では、5%近い巨大な運動ひずみの範囲で1億回にも及ぶ安定した運動が得られる。

【0034】(F) 記憶形状と運動ひずみ範囲が安定している。すなわち、変形-形状回復を繰り返しても記憶形状が失われたり、徐々に運動ひずみ範囲が小さくなる現象がないか、または非常に少ない。言い換えれば、運動ひずみの大きさが動作寿命に与える影響が少ない。この材料は、各結晶粒の大きさ、方向および配置が外部からの変形に適応した状態にあるためと考えられる。一定範囲の外部からの変形は、主に形状記憶合金特有の巨大な可逆的熱弾性変形をする結晶が受け持ち、これを超える強い外力は、可逆的熱弾性変形を発生しにくい結晶粒界領域の組織が受け持つと考えられる。多数の繰り返し動作によっても、各結晶粒の移動や変形、回転等がおきにくく、結晶自体が塑性変形を受けにくい構造である。

【0035】(G) 素材が脆くても韌性を持った線材や板材を作ることができる。可逆的大変形可能な微細な結晶粒と体積的に割合の多いアモルファス的な結晶粒界付近の組織からなるためか、一般的な形状記憶処理を施した材料より、見かけ上の韌性が高くなる。

【0036】(H) 上記各項の優れた特性が長期多数回に渡る繰り返しにおいても安定している。

【0037】本発明による形状記憶合金の処理方法の一つの態様は、形状記憶合金素材に冷間強加工を加え、該

形状記憶合金素材内部の結晶構造を破壊した後、前記形状記憶合金素材を、少なくとも回復再結晶が始まる段階では予定運動方向に応力が作用されるようにした状態で、再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱し、発生する前記予定運動方向の内部応力を徐々に緩和する形で前記予定運動方向に異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程と、オーステナイト相が残留しない極低温下で、前記予定運動方向の応力によって前記形状記憶合金素材に強い変形を加え、該応力に沿った方向に完全にマルテンサイト化した結晶粒を可逆的範囲ですべり変形させる工程と、適当な作用応力を与え拘束するか、または応力が負荷されたままの状態で、オーステナイト変態終了温度A<sub>f</sub>点と再結晶温度との間の温度に前記形状記憶合金素材を加熱し、前記予定運動方向に適した方向に各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とを有してなる。

【0038】形状記憶合金素材は、予め焼き戻し処理をしておくことが好ましい。前記異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程において、形状記憶合金素材に冷間強加工を加えるのは、形状記憶合金素材をアモルファス状態に近い状態とするためである。形状記憶合金素材が既にアモルファス状態またはそれに近い状態となっている場合は、この冷間強加工は不要となる。

【0039】前記異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程において、冷間強加工は温度特異点B（サブゼロ温度域において見られる比熱や電気抵抗等の変態を示す物性値の変曲点であり、後に「実施例」の項で詳しく説明する）より十分低い極低温状態で施すことが好ましい。これは、材料内部に残留する僅かな非マルテンサイト組織もマルテンサイト化するためである。一般的にいうマルテンサイト変態終了点

（M<sub>f</sub>点）は、完全焼き鉈しをした試験片で測定した温度であり、加工された材料には、この温度でも多くの非マルテンサイト組織が多く残留している。非マルテンサイト組織としては、残留オーステナイトや加工硬化により生じた組織等が考えられる。

【0040】前記異方性を持った微細で実質的に大きさが均一な結晶粒を生成する工程において、形状記憶合金素材を再結晶開始温度以上かつ再結晶開始温度付近の温度に短時間加熱する際には、該形状記憶合金素材に予定運動方向の応力を加えた状態としてもよいし、形状記憶合金素材を緩みのない無負荷状態で形状を拘束した状態としてもよい。この時点では、形状記憶合金素材は加熱中に予定運動方向に形状を回復できるマルテンサイト的変形成分を有するため、緩みのない無負荷状態で形状を拘束した状態としても、加熱時に予定運動方向の応力が発生するため、応力を負荷した状態で加熱するのと同様な効果が得られる。基本的に必要なのは、回復再結晶が始まる段階で予定運動方向に負荷応力状態であることで

ある。

【0041】前記各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程により、結晶粒の方向が揃えられるが、ここでいう結晶粒の方向とは、マルテンサイト変態による可逆的すべり変形を実際に起こしやすい方向であって、例えば、兄弟晶の方向のうちの一つの方向のこと等であり、必ずしも結晶学的な同一方位を意味するものではない。

【0042】前記位置関係の矛盾を結晶粒界付近の組織に塑性的な変形として集中的に蓄える工程と各結晶粒の可逆的すべり運動方向を揃える工程とは、1回行つだけでは、十分な効果を得られない場合は、必要